6Б

УДК 629.1.033.3

Е.С. Брискин, Я.В. Калинин
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия
dtm@vstu.ru

О минимизации энергозатрат при движении шагающей машины с цикловыми движителями*

Рассматриваются шагающие машины с цикловыми движителями. Синтезируется программное движение машины и её движителей, обеспечивающее минимум реактивной мощности. Рассматривается построение различных законов управления механизмами шагания в зависимости от условий движения.

Одна из проблем при разработке шагающих машин состоит в увеличении, пропорционально кубу скорости, мощности источника энергии, необходимой для поддержания движения [1], [2]. Это объясняется принципиальной особенностью движения неуравновешенных механизмов шагания, состоящей в их периодическом разгоне и торможении при переносе из одного положения в другое.

Действительно, мощность, необходимая для поддержания движения тела массы m с абсолютным ускорением a и скоростью v_r относительно системы отсчета, с которой связан источник действия на тело силы, определяется выражением

$$N = mav_r. \tag{1}$$

При определении мощности, развиваемой приводом шагающей машины, требующейся в фазе переноса стопы массы m механизма шагания типа, считается, что изменение горизонтальной скорости стопы в относительном движении в течение одного периода T описывается функцией, графически представленной на рис. 1

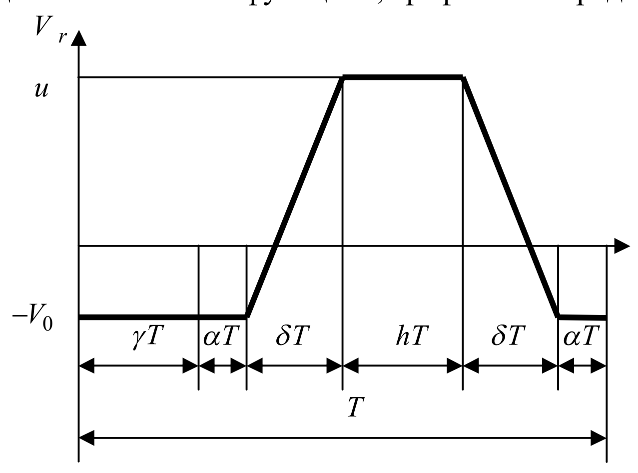


Рисунок 1 – Зависимость относительной горизонтальной скорости опоры механизма шагания от времени

* Работа выполнена при поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006 – 2008 гг.)».

Такая зависимость обусловлена кинематическими требованиями к механизму шагания и предусматривает движение с постоянной относительной скоростью v_r, направленной в сторону, противоположную движению машины, в фазе взаимодействия с грунтом (γT) и в зоне адаптации (αT), равноускоренное (σT), равномерное (hT) и равнозамедленное движение (δT) в фазе переноса стопы. Для реального механизма шагания зависимость $v_r = v_r(t)$ может отличаться, однако её качественный характер сохраняется.

Максимальная скорость u опоры механизма шагания относительно корпуса определяется из условия равенства её координаты в подвижной системе отсчета, связанной с корпусом шагающей машины, в начале и конце периода движения

$$-v_0 T + \frac{1}{2}(u + v_0)(\sigma + 2h + \delta)T = 0, \tag{2}$$

откуда

$$u = v_0 \chi, \quad \chi = \frac{2}{\sigma + 2h + \delta} - 1. \tag{3}$$

Если учесть связь между длиной шага L, коэффициентом режима γ, скоростью движения шагающей машины v и периодом движения механизма шагания T

$$\frac{L}{v_0} = \gamma T, \tag{4}$$

то для ускорения опоры на этапах разгона a_p и торможения a_T соответственно имеют место соотношения

$$a_p = \frac{u + v_0}{\sigma T} = \frac{2v_0^2 \gamma}{(\sigma + 2h + \delta)\sigma L}, \qquad a_T = \frac{u + v_0}{\delta T} = \frac{2v_0^2 \gamma}{(\sigma + 2h + \delta)\delta L}. \tag{5}$$

Поэтому для экстремальных значений мощности привода на этапах разгона $N_{p\max}$ и торможения $N_{T\min}$ имеем

$$N_{p\max} = \frac{2v_0^3 \gamma \chi m}{(\sigma + 2h + \delta)\sigma L}, \qquad N_{T\min} = -\frac{2v_0^3 \gamma \chi m}{(\sigma + 2h + \delta)\delta L}. \tag{6}$$

Фактический смысл отрицательных значений мощности состоит в том, что на соответствующих этапах движения накопленная кинетическая энергия механизма шагания преобразуется в кинетическую или потенциальную энергию других звеньев и элементов привода, а в общем случае – и в другие виды энергии (для привода, обладающего рекуперативными свойствами), или безвозвратно рассеивается в тепловую энергию.

Если для условной шагающей машины с цикловыми движителями принять, что $m = 5$ кг, $v_0 = 1$ м/с, $\gamma = 0,5$; $\delta = \sigma = 0,2$; $L = 1$ м, $h = 0$, $\chi = 4$, то экспериментальные значения мощности

$$N_{p\max} = 0,25 \text{ кВт}, \quad N_{T\min} = -0,25 \text{ кВт}.$$

При движении с достаточно высокими скоростями оценки пиковых значений мощностей (6) позволяют проводить целенаправленные мероприятия для их снижения. Так, если для рассмотренной ранее условной шагающей машины потребовать скорость движения, соизмеримую со скоростью традиционных колесных и гусеничных машин, например, 50 км/час, что соответствует примерно 15 м/с, то

$$N_{p\,\max} = 773{,}75 \text{ кВт}, \; N_{T\,\min} = -773{,}75 \text{ кВт}.$$

Для снижения пиковых значений мощностей можно увеличивать время разгона и торможения (увеличивать σ и δ), длину шага L, а также уменьшать коэффициент режима γ. Однако в этом случае за счет меньшего времени нахождения механизма шагания в опорной фазе увеличивается среднее удельное давление на грунт, требуется больше механизмов шагания для обеспечения статической устойчивости, что влечёт за собой увеличение габаритов шагающей машины и т.д. Поэтому подобное решение не всегда возможно на практике.

Здесь следует также еще отметить, что приведенный анализ неявно подразумевает управление приводным двигателем, обеспечивающим требуемый закон изменения относительной скорости (рис. 1).

Одна из принципиальных особенностей шагающей машины «Восьминог» (рис. 2) состоит в применении спаренных механизмов шагания (два механизма, объединённые жёстким кривошипом, соединённые противофазно), приводящихся в движение одним двигателем.



Рисунок 2 – Шагающая машина «Восьминог»

Поэтому когда один из механизмов шагания находится в фазе опоры, другой находится в фазе переноса и соответствующая циклограмма движения механизмов шагания обеспечивается системой управления двигателем, а самим механизмом шагания ставится задача проектирования механизма шагания, с такой циклограммой движения, которая обеспечивает минимум энергозатрат при постоянстве угловой скорости входного звена. В условиях решаемой задачи удобно принять следующую модель шагающей машины (рис. 3).

Циклограмма задается функциями

$$\begin{aligned} -x_1 &= \Pi_1(\varphi), \\ x_2 &= \Pi_2(\varphi) - x_1, \end{aligned} \tag{7}$$

где x_1, x_2 – соответственно координаты опорных точек в относительном движении механизма шагания, находящегося в опорной фазе и фазе переноса, φ – угол поворота ведущего кривошипа.

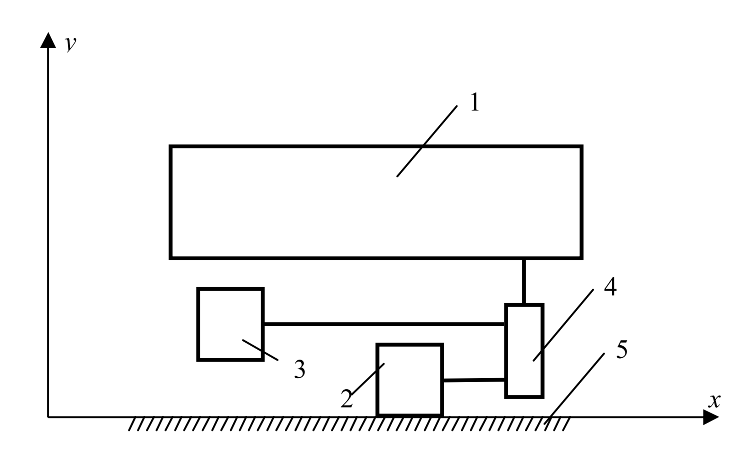


Рисунок 3 – Модельная схема поступательного движения шагающей машины:
1 – корпус; 2 – эквивалентный механизм шагания в фазе опоры;
3 – эквивалентный механизм шагания в фазе переноса;
4 – привод курсового движения; 5 – грунт

Тогда, полагая, что машина движется без проскальзывания по грунту, x_1, x_2 – координаты корпуса машины, совершающего поступательное движение, и абсолютная координата стопы механизма шагания, находящегося в переносе.

Тогда уравнения движения рассматриваемой механической системы включают в себя: дифференциальное уравнение поступательного движения корпуса:

$$M\ddot{x}_1 = \lambda_1 - Q, \tag{8}$$

Дифференциальное уравнение поступательного движения переносимой стопы:

$$m\ddot{x}_2 = \lambda_2, \tag{9}$$

уравнение голономных связей:

$$\begin{aligned} x_1 - \Pi_1(\varphi) = 0, \\ x_2 - \Pi_2(\varphi) = 0 \end{aligned} \tag{10}$$

и уравнение вращательного движения двигателя при вращении с постоянной угловой скоростью:

$$L - \lambda_1 \frac{\partial \Pi_1}{\partial \varphi} - \lambda_2 \frac{\partial \Pi_2}{\partial \varphi} = 0. \tag{11}$$

Здесь M, m – соответственно масса корпуса и масса переносимой стопы, λ_1, λ_2 – неопределенные множители Лагранжа, Q – сила сопротивления движению, L – развиваемый двигателем крутящий момент.

Полагая, что необратимые потери мощности W пропорциональны квадрату генерируемой обобщенной силы L:

$$W = \alpha L^2, \tag{12}$$

где α – коэффициент пропорциональности, для L получаем:

$$L = \left(M\ddot{x}_1 + Q\right)\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} + m_2\ddot{x}_2\frac{\partial \Pi_2}{\partial \varphi}. \tag{13}$$

Домножая (13) на $\dot{\varphi}$ и учитывая, что

$$\frac{\partial \Pi_1}{\partial \varphi}\dot{\varphi} = \dot{x}_1, \frac{\partial \Pi_2}{\partial \varphi}\dot{\varphi} = \dot{x}_2, \tag{14}$$

имеем:

$$L\dot{\varphi} = M_1\ddot{x}_1\dot{x}_1 + m_2\ddot{x}_2\dot{x}_2 + Q\dot{x}_1 = \dot{T} + Q\dot{x}_1, \tag{15}$$

где T – кинетическая энергия рассматриваемой системы.

Для того, чтобы минимизировать потери энергии, необходимо обеспечить минимум функционала

$$A = \frac{\alpha}{\dot{\varphi}^2}\int_0^\tau \left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right)^2 dt, \tag{16}$$

при выполнении дополнительных условий

$$\int_0^\tau \dot{x}_1 dt = S, \int_0^\tau \dot{x}_2 dt = 2S, \tag{17}$$

где S – длина шага механизма шагания, τ – период движения.

С учетом (17) функционал (16) изменяется

$$A = \int_0^\tau \left[\left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right) + \mu_1\dot{x}_1 + \mu_2\dot{x}_2\right]dt, \tag{18}$$

где μ_1, μ_2 – неопределенные множители.

Тогда с учетом (15) уравнения Эйлера имеют вид:

$$\begin{aligned} &2\left(\ddot{T} + Q\ddot{x}_1\right)m_2\dot{x}_2 = \mu_2, \\ &2\left(\ddot{T} + Q\ddot{x}_1\right)m_1\dot{x}_1 - 2Q\left(\dot{T} + Q\dot{x}_1\right) = \mu_1. \end{aligned} \tag{19}$$

При выполнении граничных условий

$$\dot{x}_2(0) = \dot{x}_2\left(\tau\right) = 0, \dot{x}_1(0) = \dot{x}_1\left(\tau\right) = \dot{x}_{10} \tag{20}$$

следует

$$\mu_2 = 0; \mu_1 = -2Q^2\frac{S}{\tau}. \tag{21}$$

Поэтому

$$\ddot{T} + Q\ddot{x}_1 = 0, \tag{22}$$

и остается одно содержательное уравнение

$$\dot{T} + Q\dot{x}_1 = Q\frac{S}{\tau} = Q\overline{\upsilon}_{cp}, \tag{23}$$

которое при $Q = 0$ сводится к известному результату [4]

$$\dot{T} = 0, \tag{24}$$

$\overline{\upsilon}_{cp}$ – средняя скорость движения шагающей машины.

Уравнение (23) позволяет синтезировать закон движения корпуса шагающей машины $x_1 = x_1(t)$ и уравнения движения переносимых механизмов шагания $x_2 = x_2(t)$.

Так, принимая равнопеременный закон движения корпуса, где $a = \dot{x}_{10} / (\mu\tau)$, что обеспечивает минимум его ускорения

$$\dot{x}_1 = \begin{cases} \dot{x}_{10} - at, & 0 < t < \tau/2, \\ \dot{x}_{10} - a\tau/2 + at; & \tau/2 < t < \tau, \end{cases} \tag{25}$$

из (23) следует дифференциальное уравнение, описывающее движение переносимой стопы

$$\frac{d\dot{x}_2^2}{dt} = \frac{1}{m}\left\{Q\frac{S}{\tau} - Q\dot{x}_1 - Mx_1\dot{x}_1\right\}. \tag{26}$$

Интегрируя (25) и (26), получаем x_1, x_2 как функции угла поворота кривошипа φ, где x_1 задаётся, поэтому от варьирования параметров не зависит:

$$x_1 = \begin{cases} \bar{R}\left(\varphi - \dfrac{\varphi^2}{2\mu\tau}\right), 0 \le \varphi \le \dfrac{\pi}{2}, \\ \dfrac{S}{2} + \bar{R}\left(\varphi - \dfrac{\pi}{2}\right) + \bar{R}\left(\dfrac{\varphi^2}{2\omega\mu\tau} - \dfrac{\pi\varphi}{\omega\mu\tau}\right) + \dfrac{3\pi^2}{8\mu\tau}\bar{R}^2; \dfrac{\pi}{2} \le \varphi \le \pi, \end{cases} \tag{27}$$

При этом имеем для первого периода шага (подъём стопы от грунта до максимальной высоты):

$$\frac{d}{dx}\left(\dot{x}_2^2\right) = \frac{2}{m}\left[Q\frac{S}{\tau} - Q\left(\dot{x}_{10} - \frac{\dot{x}_{10}}{\theta}t\right) - M\left(\dot{x}_{10} - \frac{\dot{x}_{10}}{\theta}t\right)\left(-\frac{\dot{x}_{10}}{\theta}\right)\right], \tag{28}$$

и после несложных преобразований получаем для второй половины (опускание стопы с максимальной высоты при переносе обратно на грунт):

$$\frac{d}{dx}\left(\dot{x}_2^2\right) = \frac{2}{m}\left[Q\frac{S}{\tau} - Q\left(\left(\dot{x}_{10} - \dot{x}_{10}\frac{\tau}{2\theta}\right) + \frac{\dot{x}_{10}}{\theta}t\right) - M\left(\left(\dot{x}_{10} - \dot{x}_{10}\frac{\tau}{2\theta}\right) + \frac{\dot{x}_{10}}{\theta}t\right)\left(\frac{\dot{x}_{10}}{\theta}\right)\right], \tag{29}$$

где θ – время полной остановки корпуса машины при заданном законе управления, μ – параметр управления разгоном-торможением корпуса машины при заданном законе управления.

Вводя обозначения:

$$A = \omega\mu\tau, \ \beta = \frac{m}{M}, \ \bar{R} = \frac{\dot{x}_{10}}{\omega}, \ q = \frac{Q\tau}{4M\dot{x}_{10}}; \tag{30}$$

получаем выражения для первого и второго периода шага соответственно:

$$K_1 = \frac{Q\dot{x}_{10}}{\theta} - \frac{M\dot{x}_{10}^2}{\theta^2}; \ L_1 = Q\frac{S}{\tau} - Q\dot{x}_{10} + \frac{M\dot{x}_{10}^2}{\theta}; \tag{31}$$

$$K_2 = -\frac{Q\dot{x}_{10}}{\theta} - \frac{M\dot{x}_{10}^2}{\theta^2}; \ L_2 = Q\frac{S}{\tau} - Q\dot{x}_{10}\left(1 - \frac{\tau}{2\theta}\right) - \frac{M\dot{x}_{10}^2\left(1 - \dfrac{\tau}{2\theta}\right)}{\theta}. \tag{32}$$

И окончательный результат можно получить в виде:

$$x_2=\begin{cases}\Pi_2\left(\varphi,\beta,\bar{R},A,q\right), 0\le\varphi\le\dfrac{\pi}{2};\\ \Pi_2\left(\varphi,\beta,\bar{R},A,q\right), \dfrac{\pi}{2}\le\varphi\le\pi.\end{cases} \tag{33}$$

Интегрируя один раз, получаем:

$$\dot{x}_2=\frac{dx_2}{dt}=\sqrt{\frac{2}{m}\left[K_{1,2}\frac{t^2}{2}+L_{1,2}t\right]}. \tag{34}$$

При этом результат второго интегрирования выражения (34) зависит от знаков и модулей коэффициентов $K_{1,2}$ и $L_{1,2}$.

Так как K_2 всегда отрицательно, то в силу неотрицательности $Q,\dot{x}_{10},\theta$ результат зависит от знака при K_1, то есть изменяется вид функции

$$x_2=\Pi_2\left(\varphi,\beta,\bar{R},A,q\right), 0\le\varphi\le\frac{\pi}{2}.$$

При отрицательном K_1 получаем независимо от знака $L_{1,2}$:

$$x_2=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{2}{\beta}}\bar{R}\left[\begin{aligned}&\left(\frac{\varphi}{2}+\frac{\omega^2 A\left[4q-{}^1\!/\!_\mu\right]}{\mu\pi^2(1-q)}\right)\sqrt{\frac{\varphi^2}{2\mu\pi}\left(4q-{}^1\!/\!_\mu\right)+\frac{(1-q)\varphi}{\mu\pi}}+\\ &+\frac{(1-q)^2}{\mu\left(4q-{}^1\!/\!_\mu\right)}\sqrt{\frac{2\mu\pi^2}{-4q+{}^1\!/\!_\mu}}\left(\arcsin\left(1+\frac{A\left(4q-{}^1\!/\!_\mu\right)\varphi}{\mu\pi^2(1-q)}\right)-\frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}\right],\\ 0\le\varphi\le\dfrac{\pi}{2}\\ \sqrt{\dfrac{2}{\beta}}\bar{R}\left[\begin{aligned}&\left(\frac{\varphi}{2}+\frac{\omega^2 A\left[4q+{}^1\!/\!_\mu\right]}{\mu\pi^2(1+q)}\right)\sqrt{\frac{\varphi^2}{2\mu\pi}\left(-4q-{}^1\!/\!_\mu\right)-\frac{\left(\left(1-{}^1\!/\!_{2\mu}\right)+q\right)\varphi}{\mu\pi}}+\\ &+\frac{\left(-\left(1-{}^1\!/\!_{2\mu}\right)-q\right)^2}{\mu\left(-4q-{}^1\!/\!_\mu\right)}\sqrt{\frac{2\mu\pi^2}{4q+{}^1\!/\!_\mu}}\left(\arcsin\left(1+\frac{A\left(4q+{}^1\!/\!_\mu\right)\varphi}{\mu\pi^2\left(\left(1-{}^1\!/\!_{2\mu}\right)+q\right)}\right)-\frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}\right],\\ \dfrac{\pi}{2}\le\varphi\le\pi\end{cases} \tag{35}$$

Полученный результат при $Q = 0 \Rightarrow q = 0$ превращается в уже известное:

$$x_2 = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{2}{\beta}}\bar{R}\left[\left(\dfrac{\varphi}{2} - \dfrac{A}{2}\right)\sqrt{\dfrac{\varphi}{A} - \dfrac{\varphi^2}{2A^2}} - \dfrac{A}{2\sqrt{2}}\arcsin\left(\left(1 - \dfrac{\varphi}{A}\right) - \dfrac{\pi}{2}\right)\right]; 0 \le \varphi \le \dfrac{\pi}{2} \\ \sqrt{\dfrac{2}{\beta}}\bar{R}\left[\left(\dfrac{\varphi}{2} + \dfrac{A}{2}\right)\sqrt{-\dfrac{\varphi}{A} - \left(\dfrac{\varphi^2}{2A^2} - \dfrac{\pi^2}{2A^2}\right)} + \dfrac{A}{2\sqrt{2}}\arcsin\left(\left(1 + \dfrac{\varphi}{A}\right) - \dfrac{\pi}{2}\right)\right]; \dfrac{\pi}{2} \le \varphi \le \pi \end{cases} \quad (36)$$

x_1, м

φ, рад

Рисунок 4 – Зависимость x_1 от угла поворота кривошипа φ в относительном движении

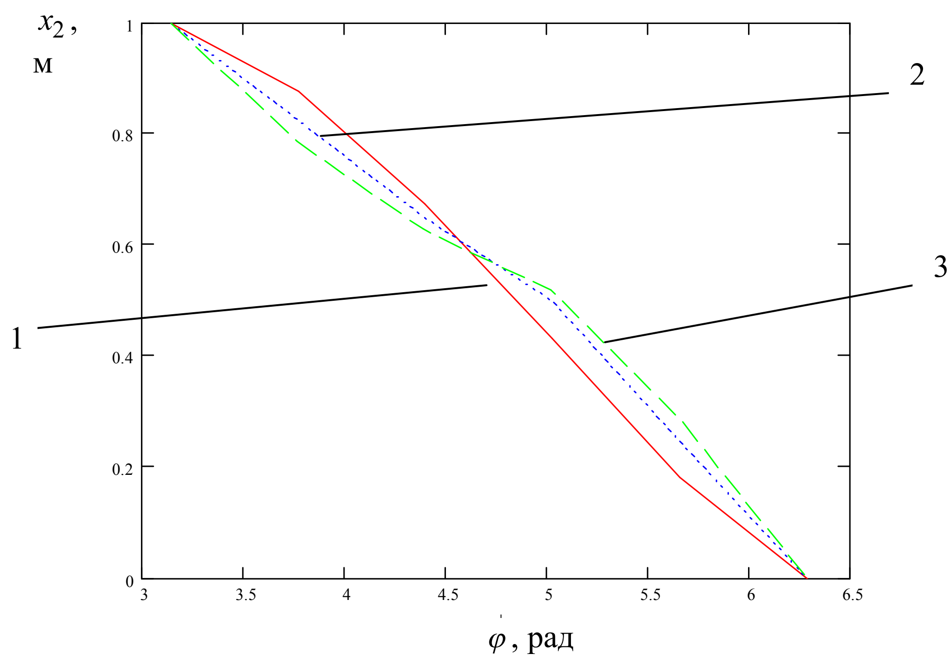


Рисунок 5 – Зависимость x_2 от угла поворота кривошипа φ в относительном движении при первом законе управления $\beta = 0{,}0415$; $\dot{x}_{cp} = 1{,}5\,м/с$; $\dot{x}_0 = 1{,}8\,м/с$; q: $1 - q = 0$; $2 - q = 0{,}2$; $3 - q = 0{,}4$

На графиках представлены зависимость (27) (рис. 4), которая будет одной и той же для всех законов управления, и зависимость (35), первый закон управления (рис. 5) для некоторых частных значений нагрузки q: $q = 0,\ q = 0,2,\ q = 0,4$, остальные расчётные параметры близки к осуществимым на машине «Восьминог». Дальнейшие графики отражают результаты исследования для других значений K_1 и $L_{1,2}$, то есть для других сочетаний условий движения и управления, которое может осуществляться как двигателем, так и путём изменения передаточного числа в трансмиссии шагающей машины (например, с помощью коробки передач или вариатора).

Анализ полученных зависимостей показывает, что с ростом нагрузки происходит видоизменение закона оптимального переноса механизма шагания: чем больше нагрузка, тем медленнее должен двигаться механизм шагания на начальном этапе переноса и сильнее на завершающем.

При обеспечении равенства $K_1 = 0$, т.е. $Q = \dfrac{M\dot{x}_{10}}{\theta} \Rightarrow q = 0,2,\ \mu = 1,25$, получаем результат на первой половине шага в виде (37) – второй закон управления (рис. 6):

$$x_2 = \sqrt{\frac{8QS}{3m\tau}}t^{3/2} = \sqrt{\frac{8QS}{3m\tau\omega^3}}\varphi^{3/2} = \sqrt{\frac{8\bar{R}S\mu}{3\beta A^2}}\varphi^{3/2},\ 0 \le \varphi \le \frac{\pi}{2}. \qquad (37)$$

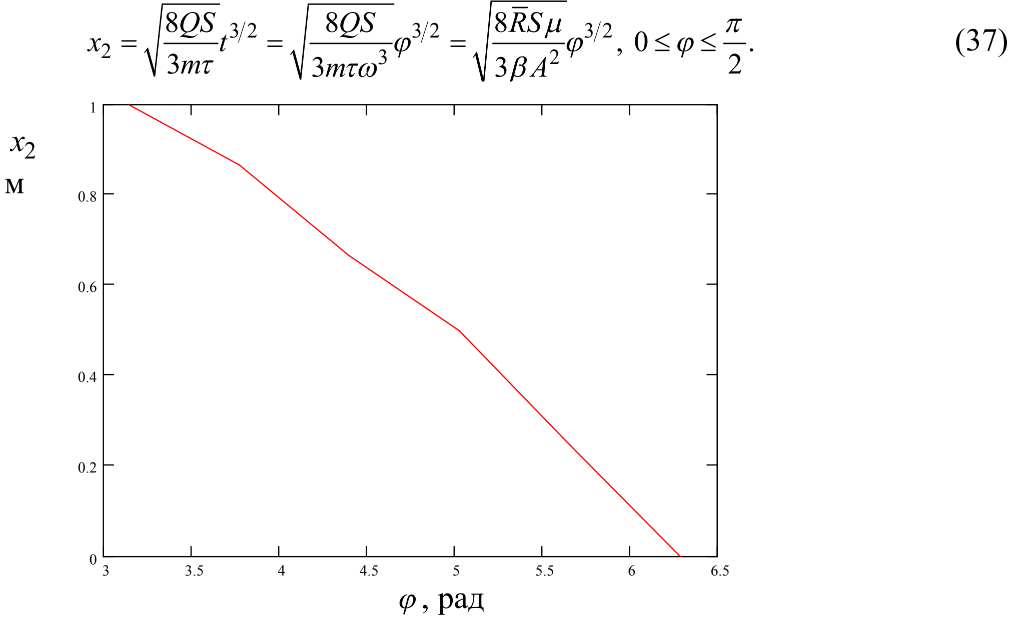


Рисунок 6 – Зависимость x_2 от угла поворота кривошипа φ в относительном движении при втором законе управления $q = 0,2;\ \beta = 0,052\quad \mu = 1,25$

При обеспечении $K_1 > 0$, т.е. $Q > \dfrac{M\dot{x}_{10}}{\theta} \Rightarrow q > 0,2;\ \mu = 1,25$, получаем (38) (рис. 7):

$$x_2 = \sqrt{\frac{2}{\beta}}\bar{R}\left[\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\omega^2 A\left[4q - 1/\mu\right]}{\mu\pi^2(1-q)}\right)\sqrt{\frac{\varphi^2}{2\mu\pi^2}\left(4q - 1/\mu\right) + \frac{(1-q)\varphi}{\mu\pi}} - \right.$$
$$\left. - \frac{(1-q)^2}{2\sqrt{2}\mu\left(-4q + 1/\mu\right)}\sqrt{\frac{2\mu\pi^2}{-4q + 1/\mu}}\ln\left|M\bar{R}^2\omega^3\left(\frac{\varphi^2}{\omega\mu\pi^2} + \frac{1-q}{\mu\pi} + \sqrt{\frac{\varphi^2}{\mu^2\pi^4}\left(4q - 1/\mu\right) + \frac{2(1-q)\varphi}{\mu^2\pi^3}}\right)\right|\right], \qquad (38)$$

$0 \le \varphi \le \dfrac{\pi}{2}.$

В случае $K_1 > 0,$ при обеспечении $L_1 = 0$ или $Q\left(\dot{x}_{10} - \frac{S}{\tau}\right) = M\frac{\dot{x}_{10}^2}{\tau}$ получаем (39) – четвёртый закон управления при $\mu = 1,25;$ $\tau = 1$ с; $S = 0,753$ м (рис. 8):

$$x_2 = \frac{\sqrt{Q\frac{\dot{x}_{10}}{m\tau} - \frac{\dot{x}_{10}^2}{\beta\tau^2}}}{2}t^2 = \frac{\bar{R}\mu}{A\sqrt{\beta}}\sqrt{q - 0,25}\varphi^2,\ 0 \le \varphi \le \frac{\pi}{2}. \quad (39)$$

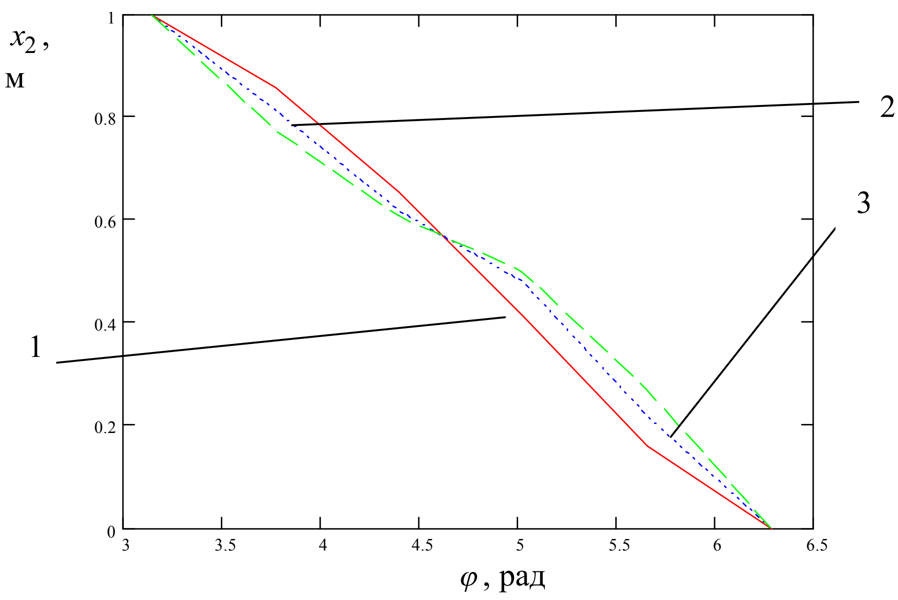


Рисунок 7 – Зависимость x_2 от угла поворота кривошипа φ в относительном движении при третьем законе управления $\beta = 0,0415;$ $\dot{x}_{cp} = 1,5 м/с;$ $\dot{x}_0 = 1,8 м/с;$ $q:$ $1 - q = 0;$ $2 - q = 0,2;$ $3 - q = 0,4$

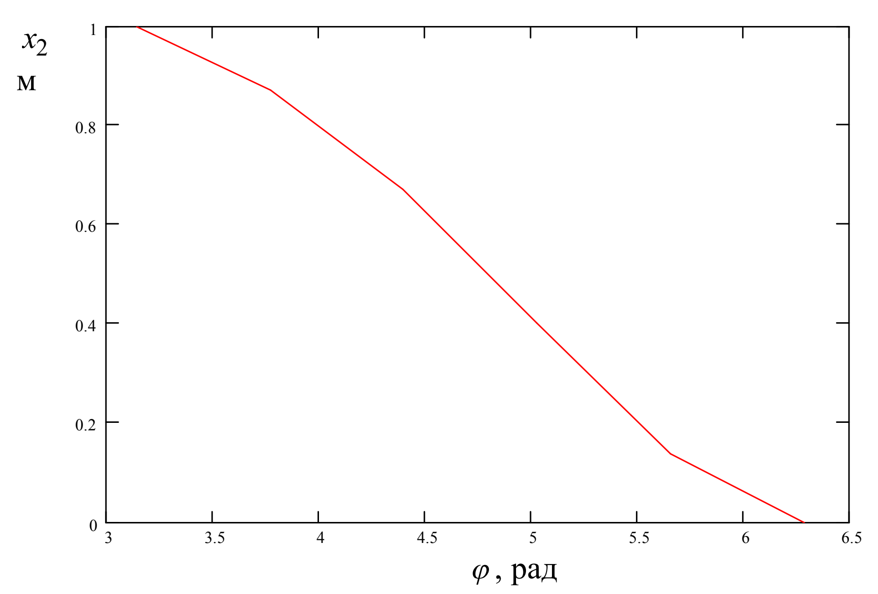


Рисунок 8 – Зависимость x_2 от угла поворота кривошипа φ в относительном движении при четвёртом законе управления $q = 0,502;$ $\beta = 0,063$

Таким образом, исследованы все возможные сочетания условий движения и управления, при которых обеспечивается энергетически оптимальное движение шагающей машины с неуравновешенными движителями. Выявлены диапазоны перехода с одного закона движения на другой. При фиксированных параметрах механизма и условий движения (массово-геометрические характеристики звеньев, длина шага, период шага) получаются два диапазона изменения нагрузки (первый и третий законы изменения x_2 как функции угла поворота кривошипа φ) и два точечных значения (второй и четвёртый законы изменения x_2 как функции угла поворота кривошипа φ). Очевидно, что устойчивыми будут лишь первый и третий законы изменения x_2 как функции угла поворота кривошипа φ, в то время как второй и четвёртый закон – неустойчивы.

Литература

1. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. – М.: Наука, 1984. – 310 с.
2. Лапшин В.В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата // Известия АН СССР. МТТ. – 1993. – № 1. – С. 38-43.

Є.С. Брискін, Я.В. Калінін
Про мінімізацію енерговитрат руху крокуючої машини із цикловими рушіями
Розглядаються крокуючі машини із цикловими рушіями. Синтезується програмний рух машини і її рушіїв, що забезпечує мінімум реактивної потужності. Розглядається побудова різних законів керування механізмами крокування залежно від умов руху.

E.S. Briskin, J.V. Kalinin
On Minimization of Energy Expenditures by Movement of Walking Machines with Cycle Movers.
Walking machines with cycle movers are under consideration. The program motion of walking machine and its movers, providing for minimum of reactive power, is synthesizing. Construction of various laws of control of walking machine movers, depending on movement conditions, is under consideration.

Статья поступила в редакцию 10.07.2008.